

太原市污灌区土壤重金属污染现状评价

解文艳^{1,2}, 樊贵盛^{1*}, 周怀平^{2,3}, 解静芳⁴, 关春林²

(1.太原理工大学环境科学与工程学院, 太原 030024; 2.山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 太原 030006; 3.山西大学生物工程学院, 太原 030006; 4.山西大学环境与资源学院, 太原 030006)

摘要:对太原市污灌区土壤重金属分布特征进行了分析评价,结果表明重金属 Pb、Zn、Cu、Ni、Mn、Cr、As、Hg、Cd 含量均值均未超过土壤环境质量标准(GB15618—1995),但其平均值均显著高于太原市土壤背景值。各重金属间的相关分析表明,Pb、Zn、Cu、Ni、Mn、Cr、As、Cd 之间呈极显著相关,说明这 8 种元素污染源可能相同。Hg 是本区表层土壤重金属污染的主要因子,重金属元素的污染程度依次为 Hg>Cd>Pb>As>Cu>Zn>Cr>Mn>Ni。土壤重金属单项污染指数均值均大于 1,综合污染指数为 2.81,总体上,污染水平为中度及其以上。各种重金属单因子污染指数和综合指数在研究区有相似的空间分布格局,总体分布趋势为东南部小店地区和中南部晋源区相对较高,南部清徐县相对较小;通过因子分析并结合污灌区污染源调查,表明 Hg 除受污水灌溉的影响外,燃煤释放的 Hg 可能是重要来源之一,Cd、Zn、Pb 和 Cu 可能来自污水灌溉和大气沉降,以污水灌溉的贡献为主,Ni、Mn、As、Cr 来自污水灌溉。Hg、Cd 是太原市污灌区土壤中需要优先控制的重金属。

关键词:土壤;重金属;污水灌溉;污染评价;太原市

中图分类号:X825 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)08-1553-08

Access of Heavy Metals Pollution of the Sewage Irrigation Region in Taiyuan, China

XIE Wen-yan^{1,2}, FAN Gui-sheng^{1*}, ZHOU Huai-ping^{2,3}, XIE Jing-fang⁴, GUAN Chun-lin²

(1.College of Environment Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024,China; 2.Institute of Agricultural Environment and Resource, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030006, China; 3.College of Biological Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 4.College of Environment and Resource, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Distribution characteristics of soil heavy metals in the sewage irrigation area in Taiyuan were investigated and analyzed. The results showed that concentrations of nine heavy metals (Pb, Zn, Cu, Ni, Mn, Cr, As, Hg and Cd) detected in the studied soils did not exceed the National Standard for Soil Environment Quality (GB 15618—1995), but they were higher than background values of Taiyuan soil. According to the correlation analysis of various heavy metals, there was a remarkable correlation among Pb, Zn, Cu, Ni, Mn, Cr, As and Cd, which suggested they might have the same origin. Hg was considered as a dominant element causing soil heavy metal pollution in the area. The order of typical heavy metal pollution extent was Hg>Cd>Pb>As>Cu>Zn>Cr>Mn>Ni. The mean value of single-factor indices of soil heavy metals in all soil samples has exceeded 1. Comprehensive pollution index of soil heavy metal was 2.81, the level of pollution was moderately pollution. The single-factor polluted index and the synthesis polluted index had similar spatial distribution pattern which revealed high concentration in the southeast and south-central parts of the region. Furthermore, measures, including factor analysis and in situ investigation, were taken to identify the main sources of heavy metals contamination, and it showed that Hg contamination resulted from anthropogenic effect as well as deposition of coal combustion. Cd, Zn, Pb, and Cu contamination were mainly from sewage irrigation, and atmosphere deposition also makes certain contribution. Ni, Mn, As and Cr contamination were attributed to sewage irrigation. Hg and Cd, which were the priority pollutants, should be frequently monitored and closely regulated in the sewage-irrigated soils in Taiyuan city.

Keywords: soil; heavy metal; sewage irrigation; pollution assessment; Taiyuan

收稿日期:2011-01-11

基金项目:太原市科技明星专项项目(08121016);太原市环保局资助项目

作者简介:解文艳(1978—),女,山西曲沃人,在读博士,助理研究员,主要从事水土环境控制研究。E-mail:xwy6018060@163.com

* 通讯作者:樊贵盛 E-mail:fanguis5507@263.net

土壤污染已经成为我国面临的重要环境问题之一,土壤重金属含量和农田土壤环境质量评价研究成为环境科学的一个重要研究领域^[1-4]。污水灌溉作为一种污水利用的方式在我国乃至世界都有广泛的应用。污水灌溉中水肥资源得到充分利用,但长期污灌容易引起污染物累积,尤其是重金属,当其累积量超过土壤的环境容量时,可通过食物链对人类健康造成潜在威胁,因而引起国内外学者的普遍关注^[4-5]。

太原污灌区是我国污灌历史较长面积较大的典型污灌区之一,长期污灌已使土壤的性质发生了较大的变化^[6]。郭翠花等^[7-9]1995—1997 年对太原市地表土中 Cu、Cd、Cr、Zn、Mn、Hg 和 As 7 种元素的含量、分布规律、污染程度、污染原因进行了研究分析,得出 Cu、Cd、Zn、Hg 元素含量超过了中国土壤背景值,Cd 污染最严重,污染面积达到 100%。张乃明等^[10-11]1996—2000 年对太原市污灌区土壤中的重金属含量及空间分布特征进行了分析,结果表明 Hg、Cd 含量在污灌区中部较高,分布在晋源区一带。刘勇等^[12]2008 年对汾河太原段土壤中 Hg、Cr 空间分布、污染状况研究表明,Hg 含量高于山西省土壤背景值和中国土壤背景值,Cr 含量与背景值相当,Hg 污染较 Cr 污染严重。这些工作了解太原市污灌区的重金属问题提供了许多有益的信息。但是,到目前为止,对太原市大范围的污灌区土壤重金属积累的情况仍缺乏系统的研究,对其土壤重金属积累的动态变化情况缺乏了解。近年来,随着环境保护措施的不断完善和环保技术水平的不断提高,污水中的重金属水平已经发生明显变化。污灌对土壤重金属积累的动态影响究竟如何目前仍有待研究,尤其是目前太原市等缺水城市拟开展大规模的中水回用,故深入研究污灌对土壤重金属积累的影响,对于评估中水回用的环境风险也有一定的参考价值。

太原市的污灌区主要集中在晋源区、小店区和清徐县。本研究通过野外调查与室内分析,对太原市不同区域污灌土壤中的重金属 Pb、Zn、Cu、Ni、Mn、Cr、As、Hg 和 Cd 积累状况进行系统调查和分析,揭示其分布特征并采用污染指数法作出相应评价,旨在为当地的农业规划、环境治理、居民的人体健康及科学灌溉等提供科学的地球化学资料和依据。

1 材料与方法

1.1 采样区概况

太原市位于山西省中部,东经 111°30′~113°09′,

北纬 37°27′~38°25′。太原市地势南低北高,地形以山地丘陵为主,最高点海拔 2 760 m,最低点海拔 760 m。气候属中温带季风半干旱半湿润气候,年平均气温 10.8℃,年日照时数 2 550~2 870 h,年降雨量 376.2 mm,无霜期 170 d,河流分属汾河流域。土壤类型以石灰性褐土和褐土性土为主。太原市的污水灌溉主要集中在清徐、小店和晋源 3 个县区。太原市污水灌溉始于 20 世纪 60 年代,太原污灌区是我国污灌历史较长、面积较大的典型污灌区之一,污灌区种植作物主要有水稻、玉米、小麦、蔬菜等。贯穿南北的汾河是太原市城市生活污水和工业废水排放的总归宿,各种污水和工业废水经 18 条支流从东西两侧汇入其内,年排放量高达 2.5 亿 m³,污灌区一般以汾河水与污水混合灌溉为主。

1.2 样品的采集

土样于 2008 年 4 月采集,采样点位按污水渠流向采用网格布点法布设,GPS 定位,同时考虑污水水质、土壤类型、污灌历史等因素,共布设 135 个 0~20 cm 土采样点,各区采样点数量分布如下:小店区 50 个表土采样点、4 个分层采样点,尖草坪区 15 个表土采样点、2 个分层采样点,晋源区 35 个表土采样点、3 个分层采样点,清徐县 50 个表土采样点、4 个分层采样点。布点后用土壤采样器采取 2 kg 左右土壤,进行编号登记后带回实验室进行预处理。具体采样点位见图 1。

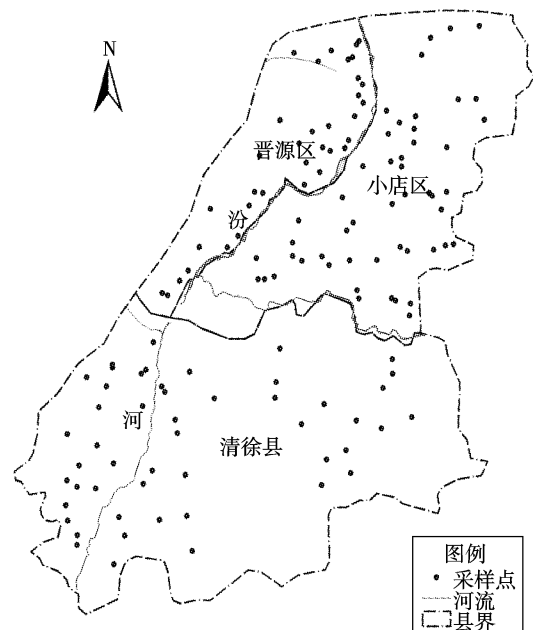


图 1 太原市污灌区土壤重金属污染调查样点分布图

Figure 1 Soil sampling sites of heavy metal investigation in sewage irrigated area, Taiyuan City

1.3 分析测试方法

土壤样品风干后过 100 目尼龙筛,用 $\text{HNO}_3\text{--H}_2\text{O}_2$ 法^[13]消煮后测定 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Mn、Zn 含量;硝酸-盐酸混合液(体积比 1:1)于沸水浴中消煮 2 h 后用于测定 Hg^[14]含量。消煮液中 Cd 含量用石墨炉-原子吸收光谱法测定;Cr、Cu、Ni、Pb、Mn、Zn 含量用火焰-原子吸收光谱法测定;As、Hg 含量用原子荧光法测定。分析过程所用试剂均为优级纯。所有测定均由空白样和加标回收样进行质量控制,各种重金属的回收率均在国家标准参比物质的允许范围内。

土壤重金属污染评价标准采用 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》的二级标准和太原市土壤重金属元素背景值^[15](见表 1),采用单项/综合污染指数法对土壤重金属污染进行评价。

全部数据采用 Grubbs 法进行异常值剔除。相关分析、主成分分析以及方差分析用 SPSS11.5 完成,正态分布检验用 Origin Pro 完成。

表 1 太原市土壤重金属元素背景值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 1 Background values of heavy metals in the soil environment($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

元素	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	Cr	Mn	As	Hg
背景值	18.4	56.3	13.8	0.077	29.1	57.3	505.0	7.6	0.033

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量分布

监测分析可知,太原市污灌区不同区域土壤中重金属含量分布差别较大(表 2),采用《土壤环境质量标准》中的二级标准进行对比分析。由表 2 可知 Pb、Zn、Cu、Ni、Mn、Cr、As、Hg、Cd 含量分别在 16.8~52.5、52.4~259.0、14.9~48.9、17.8~46.7、409.0~926.0、48.0~93.9、5.3~16.3、0.02~0.18、0.11~0.26

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均未超过土壤环境质量二级标准。总体上,9 种重金属含量均值大小依次为:Mn>Zn>Cr>Ni>Cu>Pb>As>Cd>Hg。但从不同研究区域看,除重金属 Hg 外,小店区的土壤重金属含量最高,其余两个区域重金属含量差异不大,呈现小店区>晋源区>清徐县的趋势。重金属 Hg 含量在晋源区为最大,清徐县为最小,两地含量分别为 0.16、0.06 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。因为晋源区主要分布有多家化工厂、太原市第一热电厂、造纸厂、医药园区等企业,Hg 污染除了跟这些厂矿企业的高耗能有关,工业三废排放灌溉土壤也是 Hg 污染的重要来源。变异系数反映了总体样本中各采样点的平均变异程度^[16],其数值越大,土壤差异越大,反之土壤差异就小。该区域 Hg 的变异系数最大,达到 137.80%,Cr 的变异系数最小,为 9.70%,平均变异系数由大到小的顺序为: Hg、Cd、Zn、As、Cu、Pb、Ni、Mn、Cr。从土壤中重金属的变异系数来看,除了 Hg 变异系数较高外,其他都较小,表明样点重金属指数值的平均变异程度均较小。

以相关元素背景值为评价标准,它是土壤环境质量评价的最基本的依据之一,也是判别土壤污染程度与否的重要标准之一^[17]。通过与太原市土壤重金属背景值^[15]比较(表 3),土壤 Pb、Zn、Cu、Ni、Mn、Cr、As、Hg、Cd 含量均显著高于背景值($P<0.01$)。其中,土壤 Hg 含量与背景值的差别最为明显,其平均值为背景值的 2.7 倍,最高达到背景值的 40 倍左右;土壤 Cd 含量平均值为背景值的 2.4 倍,最小值为背景值的 1.4 倍。Pb、Cd 超标率为 100%,Zn、Cu、Mn、Cr、As 的超标率都在 94%以上,Hg、Ni 超标率分别为 89%、72%。可见,由于工农业发展和城市化加快,常年使用污水灌溉,太原市污灌区土壤已表现出不同程度的重

表 2 太原市污灌区表层土壤中重金属含量特征

Table 2 Content characteristics of soil heavy metal in sewage-irrigation areas

区域		Pb	Zn	Cu	Ni	Mn	Cr	As	Hg	Cd
小店区	含量范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	19.4~52.5	60.8~259.0	19.1~48.9	23.3~46.7	535.0~925.0	67.3~99.7	8.0~21.3	0.02~0.18	0.12~0.45
	均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	27.53	99.04	33.30	38.12	744.16	85.03	14.46	0.07	0.24
	变异系数/%	22.50	29.26	18.49	13.94	12.05	7.31	17.10	41.83	31.51
晋源区	含量范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	19.0~40.4	52.4~102.0	14.9~41.9	17.8~41.2	409.0~926.0	48.0~93.9	5.3~16.3	0.03~1.30	0.11~0.26
	均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	26.36	80.00	27.93	31.05	628.29	76.92	10.39	0.16	0.17
	变异系数/%	17.64	13.43	18.12	14.58	15.29	11.87	22.48	129.83	19.32
清徐县	含量范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	16.8~29.1	53.7~97.3	17.4~37.3	21.8~42.6	524.0~913.0	67.1~89.2	7.3~17.5	0.02~0.41	0.11~0.22
	均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	21.80	72.07	24.34	31.11	674.68	77.50	11.95	0.06	0.16
	变异系数/%	13.08	15.75	21.00	18.41	14.94	6.84	20.87	105.33	16.38

表 3 土壤重金属与太原市土壤重金属背景值比较(mg·kg⁻¹)
Table 3 The comparison between soil heavy metals with Taiyuan soils background values(mg·kg⁻¹)

元素	Pb	Zn	Cu	Ni	Mn	Cr	As	Hg	Cd
平均值	25.11	84.11	28.59	33.69	688.39	80.14	12.47	0.089	0.189
背景值	13.80	56.30	18.40	29.10	505.00	57.30	7.60	0.033	0.077

金属累积现象。

2.2 污灌区土壤重金属元素间的相关分析

由于地球化学条件的相似性,以及造成土壤污染的污染源中金属元素共存于土壤中,导致重金属元素在总量上存在相关性。元素间相关性显著和极显著,说明元素间一般具有同源关系或是复合污染^[7],为了解各重金属元素之间的相关性,对各土样重金属元素两两之间进行相关分析。分析结果表明(表 4),Pb、Zn、Cu、Ni、Mn、Cr、As、Cd 之间呈极显著相关,说明太原市污灌区土壤中这 8 种元素可能具有相似的来源,主要来自工业废水及城镇生活污水灌溉土壤、施用农业化肥及农药产生的面源污染等。Hg 与其他元素间

相关性不显著。

主成分分析作为一种用来辅助数据分析的统计方法,可进一步对数据进行详细解释,例如污染来源的确定以及自然和人为因素对土壤元素的贡献等。对 9 种重金属进行主成分分析发现(表 5),在因子的初始矩阵中,Pb、Zn、Cu、Ni、Mn、As、Cd 在因子 1 (F1)中显示出较高的因子负荷,Hg、Pb 在因子 2 (F2),Hg 在因子 3(F3),Cr 在因子 4(F4)中分别表现出较高的值(表 6)。

经过矩阵变换后,F1 包含 Pb、Zn、Cu、Cd,F2 包含 Ni、Mn、As,F3 包含 Cr,F4 包含 Hg(表 6)。

2.3 污灌区表层土壤重金属的污染评价

首先采用单因子污染指数法对土壤 Pb、Zn、Cu、Ni、Mn、Cr、As、Hg、Cd 的污染程度进行评价。单项污染指数法是目前环境评价中采用较多的一种评价方法,即将单项因子实测含量(C_i ,mg·kg⁻¹)与其标准或背景值(C_0 ,mg·kg⁻¹)进行对比,作为该因子的污染指数(P_i)。本研究所用的重金属的背景值是根据文献^[15]

表 4 太原市污灌区土壤重金属含量的偏相关系数

Table 4 Partial correlations between heavy metal concentrations in the soils from sewage-irrigation area in Taiyuan

	Pb	Zn	Cu	Ni	Mn	Cr	As	Hg	Cd
Pb	1	0.832**	0.745**	0.580**	0.375**	0.241**	0.293**	0.169	0.670**
Zn		1	0.778**	0.710**	0.516**	0.456**	0.506**	0.094	0.772**
Cu			1	0.836**	0.652**	0.410**	0.659**	0.145	0.738**
Ni				1	0.822**	0.482**	0.858**	0.052	0.622**
Mn					1	0.386**	0.766**	0.036	0.472**
Cr						1	0.511**	-0.009	0.376**
As							1	-0.055	0.448**
Hg								1	0.062
Cd									1

注:* 显著性相关(样本数 $n=135$,显著性水平 $P<0.05$);** 极显著性相关(样本数 $n=135$,显著性水平 $P<0.01$)。

表 5 太原市污灌区土壤重金属含量的主成分分析

Table 5 Principal component analysis of heavy metal concentrations in the soils from sewage-irrigation area in Taiyuan

成分	初始特征值			提取后特征值			变换后特征值		
	特征值	解释方差/%	累积方差/%	特征值	解释方差/%	累积方差/%	特征值	解释方差/%	累积方差/%
1	5.219	57.985	57.985	5.219	57.985	57.985	3.165	35.163	35.163
2	1.268	14.093	72.079	1.268	14.093	72.079	2.827	31.414	66.577
3	0.912	10.131	82.209	0.912	10.131	82.209	1.093	12.143	78.720
4	0.706	7.844	90.053	0.706	7.844	90.053	1.020	11.333	90.053
5	0.321	3.568	93.621						
6	0.235	2.610	96.232						
7	0.170	1.892	98.124						
8	0.097	1.075	99.198						
9	0.072	0.802	100.000						

表 6 太原市污灌区土壤重金属含量主成分分析因子矩阵

Table 6 The component matrix of principal component analysis of heavy metal concentrations in the soils from sewage-irrigation area in Taiyuan

重金属	主成分				旋转主成分			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Pb	0.749	0.517	-0.233	-0.051	0.923	0.144	-0.002	0.110
Zn	0.872	0.282	-0.211	0.094	0.864	0.305	0.233	0.026
Cu	0.918	0.131	-0.002	-0.106	0.724	0.569	0.116	0.102
Ni	0.927	-0.202	0.119	-0.152	0.487	0.817	0.179	0.023
Mn	0.780	-0.348	0.243	-0.267	0.249	0.889	0.081	0.030
Cr	0.570	-0.309	0.050	0.752	0.196	0.268	0.937	-0.009
As	0.783	-0.492	0.191	-0.098	0.187	0.886	0.277	-0.071
Hg	0.100	0.579	0.800	0.106	0.080	-0.007	-0.009	0.995
Cd	0.799	0.262	-0.247	0.051	0.814	0.272	0.179	-0.023

选取的(见表 1)。

单因子污染指数法仅能对某一种重金属元素污染进行评价,而土壤污染往往是多个重金属元素复合污染导致的,该方法不能全面的、综合反映土壤的污染程度,因此再利用尼梅罗综合指数法将单因子污染指数按一定的方法综合起来进行评价。尼梅罗综合指数法具体计算公式为:

$$P_{\text{综合}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{MAX}}^2}{2}} \quad (1)$$

式中: P_{ave} 为单因子污染指数平均值, P_{MAX} 为污染指数最大值。

土壤污染评价等级划分标准见表 7。

以相关元素背景值为评价参照标准,计算研究区域 135 个样点表层土壤 9 种重金属的单因子污染指

表 7 土壤污染评价分级标准

Table 7 The classification standards of soil pollution evaluation

等级划分	$P_{\text{综}}$	污染等级	污染水平
I	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全	清洁
II	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$	警戒级	尚清洁
III	$1 < P_{\text{综}} \leq 2$	轻污染	土壤轻污染作物开始受到污染
IV	$2 < P_{\text{综}} \leq 3$	中污染	土壤作物均受中度污染
V	$P_{\text{综}} > 3$	重污染	土壤作物均受污染已相当严重

表 8 太原市污灌区土壤重金属污染评价

Table 8 Pollution evaluation of soil heavy metal in in the soils from sewage-irrigation area in Taiyuan

研究区	单项污染指数(P_i)									综合污染指数($P_{\text{综合}}$)	污染等级及水平
	Pb	Zn	Cu	Ni	Mn	Cr	As	Hg	Cd		
小店区	2.00	1.76	1.81	1.31	1.47	1.48	1.90	2.11	3.09	2.61	IV级,中污染
晋源区	1.91	1.42	1.52	1.07	1.24	1.34	1.37	4.89	2.15	3.81	V级,重污染
清徐县	1.58	1.28	1.32	1.07	1.34	1.35	1.57	1.72	2.04	2.01	IV级,中污染
均值	1.83	1.49	1.55	1.15	1.35	1.39	1.61	2.91	2.43	2.81	IV级,中污染

数值和综合污染指数值,分析结果见表 8。

从表 8 看出,根据单项污染指数法和综合污染指数法,土壤已受到重金属污染。在研究区中的重金属,Pb、Zn、Cu、Ni、Mn、Cr、As、Hg、Cd 的单项污染指数变化范围分别为:1.22~3.80、0.93~4.60、0.81~2.66、0.61~1.60、0.81~1.83、0.84~1.74、0.70~2.80、0.64~39.39、1.38~5.88;单因子污染指数均值分别为:1.83、1.49、1.55、1.15、1.35、1.39、1.61、2.91、2.43,均大于 1。

综合污染指数均值为 2.81,土壤开始受到污染,处于中度污染水平。Hg 和 Cd 的污染指数相对最高,对环境的污染也最大。表层土壤重金属的平均单因子污染指数从大到小依次为: $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Mn} > \text{Ni}$ 。由综合污染指数评价结果看,晋源区的重金属污染程度明显高于小店区和清徐县,即:晋源区>小店区>清徐县。但也不排除外来因素对土壤重金属的影响。

3 讨论

农田土壤中重金属的来源除受成土母质的影响外,主要受化肥农药施用、大气沉降和污水灌溉等人类活动的影响^[18]。以区域为评价单位,对小店区、晋源区和清徐县的土壤重金属单因子污染指数值和综合污染指数值进行了分析和比较,说明太原市污灌区土壤重金属污染分布特征和来源,结果见表 9。结合太原市工矿企业分布情况和主成分分析结果以及表 9,可以得出以下结论:

因子 1 为元素 Cd、Zn、Pb 和 Cu 的组合,从表 9 可以看出,Cd、Zn、Pb 和 Cu 在研究区东南部小店区土壤中基本都处于轻度污染及以上,Cd 有 48.0%土壤样点处于重度污染;重金属 Zn 个别点富集程度较高,污染达到中度污染及以上;Pb、Cu 有 30%左右土壤样点处于中度污染及以上,形成污染浓集中心。其余 2 个区 Cd 有 50.0%以上土壤样点处于中度污染;Zn、Pb 和 Cu 均处于轻度污染及以下。造成这种分布格局的原因包括:研究区内东南部小店地区拥有太原橡胶

表 9 太原市不同污灌区土壤重金属污染指数统计分析

Table 9 Descriptive statistics of heavy metal pollution index in the soils from different regional of sewage-irrigation area in Taiyuan

污灌区	样本数	项目	平均值	$P_i \leq 1$		$1 < P_i \leq 2$		$2 < P_i \leq 3$		$P_i > 3$	
				样本数	频率	样本数	频率	样本数	频率	样本数	频率
小店区	50	P_{-Pb}	2.00	0	0	33	66	15	30	2	4
		P_{-Zn}	1.76	0	0	44	88	4	8	2	4
		P_{-Cu}	1.81	0	0	37	74	13	26	0	0
		P_{-Ni}	1.31	2	4	48	96	0	0	0	0
		P_{-Mn}	1.47	0	0	50	100	0	0	0	0
		P_{-Cr}	1.48	0	0	50	100	0	0	0	0
		P_{-As}	1.90	0	0	33	66	17	34	0	0
		P_{-Hg}	2.11	1	2	29	58	12	24	8	16
		P_{-Cd}	3.09	0	0	4	8	22	44	24	48
		$P_{-综合}$	2.61	0	0	9	18	30	60	11	22
晋源区	35	P_{-Pb}	1.91	0	0	24	68.57	11	31.43	0	0
		P_{-Zn}	1.42	1	2.86	34	97.14	0	0	0	0
		P_{-Cu}	1.52	1	2.86	31	88.57	3	8.57	0	0
		P_{-Ni}	1.07	12	34.29	23	65.71	0	0	0	0
		P_{-Mn}	1.24	2	5.71	33	94.29	0	0	0	0
		P_{-Cr}	1.34	1	2.86	34	97.14	0	0	0	0
		P_{-As}	1.37	4	11.43	30	85.71	1	2.86	0	0
		P_{-Hg}	4.89	2	5.71	4	11.43	8	22.86	21	60
		P_{-Cd}	2.15	0	0	14	40	19	54.29	2	5.7
		$P_{-综合}$	3.81	0	0	10	28.57	11	31.43	14	40
清徐县	50	P_{-Pb}	1.58	0	0	49	98	1	2	0	0
		P_{-Zn}	1.28	5	10	45	90	0	0	0	0
		P_{-Cu}	1.32	7	14	41	82	2	4	0	0
		P_{-Ni}	1.07	24	48	26	52	0	0	0	0
		P_{-Mn}	1.34	0	0	50	100	0	0	0	0
		P_{-Cr}	1.35	0	0	50	100	0	0	0	0
		P_{-As}	1.57	2	4	41	82	7	14	0	0
		P_{-Hg}	1.72	12	24	32	64	3	6	3	6
		P_{-Cd}	2.04	0	0	27	54	23	46	0	0
		$P_{-综合}$	2.01	0	0	38	76	9	18	3	6

厂、太原线织印染厂、山西针织厂和山西毛纺厂,这些工矿企业的污水排放灌溉土壤以及施用化肥、农药等造成小店区 Cd、Zn、Pb 和 Cu 局部高度富集;太原市污灌区表层土壤中 Cd、Zn、Pb 含量东南方位小店地区比晋源区高,恰好与当地的主风向一致,表明大气中含 Cd、Zn、Pb 污染物的干湿沉降也是造成小店区 Cd、Zn、Pb 污染较严重的一个重要原因。

因子 2 为元素 Ni、Mn、As 的组合,从表 9 可知,太原市污灌区表层土壤 Ni、Mn、As 基本处于轻度污染及以下,只有小店区 As 有 30%土壤样点富集程度较高,污染达到中度污染,其形成原因可能与印染厂等污水排放灌溉土壤有关。

因子 3 为元素 Cr,Cr 的污染属于面积型的,在研究区基本都处于轻度污染,其形成原因主要是研究区厂矿企业排放污水灌溉土壤引起,虽然目前太原市土壤 Cr 污染并不十分严重,但如果不在源头上加以控制,Cr 的污染就会很快在程度上和范围上进一步加深和扩大,由于太原市特殊的工业布局,太原钢铁厂、太钢污水处理厂、新华化工厂、东安化工厂、太原工具厂等大型重污染企业位于太原市城区的北部,太原市常年尤其是冬季盛行西北风,同时由于太原市独特的地理地形特点,污染物有向南迁移的特点,这些必需引起有关部门的足够重视。

因子 4 为元素 Hg,Hg 是太原市污染最严重的重

金属元素之一,这在我国城市中极为常见,尤其是在我国北方城市中表现得尤其突出^[9]。从表9可以看出,汞污染属于面积型污染,几乎在太原市污灌区的绝大部分面积的土壤中都存在一定程度的汞污染,尤其是中南部晋源区最为严重,其次是小店区。燃煤造成的大气Hg沉降是太原市地表土Hg污染的一个主要原因,无论是工业用煤还是居民用煤,而且燃烧方式落后。燃煤是太原市最主要的能耗方式,太原市Hg污染在以前的研究中就有所报道,有关部门也为Hg污染的治理做过许多工作。Hg污染除了燃煤来源外,工业排放废水灌溉土壤也是太原市污灌区土壤Hg污染的另一个重要来源,在污染最严重的晋源区主要分布有多家太原化工厂,太原市第一热电厂、造纸厂、医药园区;小店区有太原橡胶厂、太原线织印染厂、山西针织厂和山西毛纺厂,Hg污染除了跟这些厂矿企业的高耗能有关,工业三废的排放也是Hg污染的重要来源。另外,Hg污染与汽车尾气的排放也有很大关系。太原市污灌区土壤Hg污染程度较重,加之土壤Hg污染具有较强的累积性,必须切实加以控制。

4 结论

(1)太原市污灌区土壤中重金属含量分布差别较大,Pb、Zn、Cu、Ni、Mn、Cr、As、Hg和Cd含量均值分别为25.11、84.11、28.59、33.69、688.39、80.14、12.47、0.089、0.189 mg·kg⁻¹,均未超过土壤环境质量标准(GB 15618—1995),但其平均值均显著高于太原市土壤背景值。

(2)研究区土壤重金属单因子污染指数值由大到小顺序为Hg、Cd、Pb、As、Cu、Zn、Cr、Mn、Ni。其中Hg为主要污染因子,Cd为次要污染因子,两者为重度污染;其次为Pb、Cu、As,为中度污染,Zn、Mn、Cr、Ni则基本上为轻度污染。

(3)研究区域内表层土壤平均尼梅罗综合污染指数达2.72,主要因为Hg和Cd的单因子污染指数较高,产生极高贡献率,使得综合污染指数值达到很高的污染水平。

(4)各重金属单因子污染指数和综合污染指数在太原市污灌区有相似的空间分布格局,总体分布趋势为东南部小店地区和中南部晋源区相对较高,南部清徐县相对较小。

(5)通过因子分析并结合污灌区污染源调查,表明Hg除受污水灌溉的影响外,燃煤释放的Hg可能是重要来源之一,Cd、Zn、Pb和Cu可能来自污水灌溉

和大气沉降,以污水灌溉的贡献为主,Ni、Mn、As、Cr来自污水灌溉。Hg、Cd是太原市污灌区土壤中需要优先控制的重金属。

参考文献:

- [1] Miguel de Paz J, Sanchez J, Visconti F. Combined use of GIS and environmental indicators for assessment of chemical, physical and biological soil degradation in a Spanish Mediterranean region[J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, 79: 150–162.
- [2] 柴世伟,温焱茂,韦献革,等. 珠江三角洲主要城市郊区农业土壤的重金属含量特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(4): 90–94.
CHAI Shi-wei, WEN Yan-mao, WEI Xian-ge, et al. Heavy metal content characteristics of agricultural soils in the Pearl River delta[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2004, 43(4): 90–94.
- [3] 王国梁,周生路,赵其国,等. 菜地土壤剖面上重金属元素含量随时间的变化规律研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 79–84.
WANG Guo-liang, ZHOU Sheng-lu, ZHAO Qi-guo, et al. Spatial and temporal changes of soil heavy metal concentrations in vegetable cultivation land[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(1): 79–84.
- [4] 崔刑涛,栾文楼,石少坚,等. 石家庄污灌区土壤重金属污染现状评价[J]. 地球与环境, 2010, 38(1): 36–42.
CUI Xing-tao, LUAN Wen-lou, SHI Shao-jian, et al. Soil heavy metal pollution assessment in the sewage irrigation region of Shijiazhuang city[J]. *Earth and Environment*, 2010, 38(1): 36–42.
- [5] 刘小娟,解静芳,范仁俊,等. 太原市污灌区土壤有效态铜锌和锰含量评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3): 506–509.
LIU Xiao-juan, XIE Jing-fang, FAN Ren-jun, et al. The assessment on available contents of Cu, Zn and Mn in soils of sewage irrigation in Taiyuan, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(3): 506–509.
- [6] 张乃明. 太原污灌区土壤重金属污染研究[J]. 农业环境保护, 1996, 15(1): 21–23.
ZHANG Nai-ming. Present situation evaluation of the heavy metal pollution in sewage irrigation area of Taiyuan[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1996, 15(1): 21–23.
- [7] 郭翠花,黄淑萍,原洪波,等. 太原市地表土中五种重金属元素的污染监测及评价[J]. 山西大学学报(自然科学版), 1995, 18(2): 222–226.
GUO Cui-hua, HUANG Shu-ping, YUAN Hong-bo, et al. Monitoring and evaluation of heavy-metal pollution state in surface-layer soil of Taiyuan city[J]. *Journal of Shanxi University(Natural Science Edition)*, 1995, 18(2): 222–226.
- [8] 郭翠花,王应刚,任艳萍,等. 太原市地表土汞含量的分布特征[J]. 山西大学学报(自然科学版), 1996, 19(3): 339–344.
GUO Cui-hua, WANG Ying-gang, REN Yan-ping, et al. The distribution characteristics of Hg-element content in the surface soil in Taiyuan[J]. *Journal of Shanxi University(Natural Science Edition)*, 1996, 19(3): 339–344.
- [9] 郭翠花,孟紫强. 太原市地表土砷含量分布及污染评价[J]. 农业环境

- 保护, 1997, 16(2):61-64.
- GUO Cui-hua, MENG Zi-qiang. Pollution assessment and distribution characteristics of As-element content in the surface soil in Taiyuan[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1997, 16(2):61-64.
- [10] 张乃明, 李保国, 胡克林. 太原污灌区土壤重金属及盐分的空间变异特征[J]. 环境科学学报, 2001, 21(3):348-353.
- ZHANG Nai-ming, LI Bao-guo, HU Ke-lin. Spatial variabilities of heavy metals and salt contents in soils of Taiyuan sewage irrigation region[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(3):348-353.
- [11] 张乃明, 李保国, 胡克林. 污水灌区耕层土壤中铅、镉的空间变异特征[J]. 土壤学报, 2003, 40(1):151-154.
- ZHANG Nai-ming, LI Bao-guo, HU Ke-lin. The spatial variation characteristics of lead and cadmium in the soil of the sewage irrigation area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(1):151-154.
- [12] 刘 勇, 张 红, 尹京苑. 汾河太原段土壤中 Hg、Cr 空间分布与污染评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5):57-60.
- LIU Yong, ZHANG Hong, YIN Jing-yuan. Pollution assessment and spatial distribution of soil Hg and Cr in the Taiyuan area of the Fenhe river[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(5):57-60.
- [13] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Method 3050B: Acid digestion of sediments sludges and soils (revision 2) [R]. 1996.
- [14] Macleod CL, Scrimshaw MD, Emmerson R H C, et al. Geochemical changes in metal and nutrient loading at uplands farm managed retreat site, Essex, UK (April 1995-1997) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, 38:1115-1125.
- [15] 钮少颖. 山西省土壤地质环境元素与人体健康[J]. 山西能源与节能, 2008(1):31-32.
- NIU Shao-ying. Study on the agrogeological environment in Shanxi and human body health[J]. *Shanxi Energy and Conservation*, 2008(1):31-32.
- [16] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- China Environmental Monitoring Station. Background values of soil elements in China[M]. Beijing: China Environment Science Press, 1990.
- [17] 裴延全, 王里奥, 包 亮, 等. 三峡库区小江流域土壤重金属的分布特征与评价分析[J]. 土壤通报, 2010, 41(2):206-211.
- PEI Ting-quan, WANG Li-ao, BAO Liang, et al. Distribution characteristics and evaluation of soil heavy metals in water-level-fluctuating zone in Xiaojiang river[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(2):206-211.
- [18] 吴光红, 苏睿先, 李万庆, 等. 大沽排污河污灌区土壤重金属富集特征和来源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(6):1693-1698.
- WU Guang-hong, SU Rui-xian, LI Wan-qing, et al. Source and enrichment of heavy metals in sewage-irrigated area soil of Dagou sewage discharge channel[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(6):1693-1698.
- [19] 王雄军, 赖健清, 鲁艳红, 等. 基于因子分析法研究太原市土壤重金属污染的主要来源[J]. 生态环境, 2008, 17(2):671-676.
- WANG Xiong-jun, LAI Jian-qing, LU Yan-hong, et al. Main source of soil heavy metal pollution based on factor analysis in Taiyuan[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2):671-676.